

Laboratório Máquinas - Segunda Unidade

September 15, 2024

1 Questões em sala

1.1 Como se produz o torque na Máquina CC?

O torque em uma máquina de corrente contínua (CC) é produzido pela interação entre o campo magnético gerado pelo *enrolamentodecampo* (ou ímãs permanentes) e a corrente que flui através dos condutores da armadura (rotor). Esse processo eletromagnético é descrito pela *LeideLorentz*, que define a força exercida sobre uma carga em movimento em um campo magnético.

1.1.1 Princípio de Geração de Torque na Máquina CC

Campo Magnético e Corrente na Armadura

- Quando uma corrente elétrica passa pelos condutores da *armadura* (localizada no rotor), esses condutores estão imersos no campo magnético criado pelo *enrolamentodecampo* (ou pelos ímãs permanentes, dependendo do tipo de máquina CC).
- A corrente elétrica nos condutores da armadura cria seu próprio campo magnético. A interação entre o campo magnético do estator (enrolamento de campo) e o campo magnético da armadura gera uma força eletromagnética nos condutores.

Força de Lorentz De acordo com a *LeideLorentz*, a força (F) exercida sobre um condutor que transporta uma corrente (I) e está imerso em um campo magnético (B) é dada pela fórmula:

$$F = B \cdot I \cdot L$$

- B é a densidade do fluxo magnético (em Tesla),
- I é a corrente elétrica nos condutores da armadura (em Ampères),
- L é o comprimento dos condutores que estão imersos no campo magnético (em metros).

Essa força é perpendicular tanto à direção do campo magnético quanto à direção do fluxo de corrente, resultando em uma força tangencial nos condutores da armadura. Quando todos os condutores no rotor experimentam essa força, eles geram um movimento de rotação no rotor.

1.1.2 Produção de Torque

O torque total (T) gerado na máquina CC é a soma das forças que atuam nos condutores da armadura, multiplicadas pelo raio do rotor (R). O torque pode ser expresso pela seguinte fórmula:

$$T = k \cdot \Phi \cdot I_a$$

- T é o torque (em Newton-metros),
- k é uma constante de proporcionalidade que depende da geometria da máquina,
- ϕ é o fluxo magnético gerado pelo campo (em Weber),
- I_a é a corrente que passa pela armadura (em Ampères).

1.1.3 Torque e Velocidade

À medida que o torque é gerado, ele faz com que o rotor gire. O torque gerado é diretamente proporcional à corrente que circula na armadura (I_a) e ao fluxo magnético (ϕ) gerado pelo campo. Portanto, se a corrente de armadura aumentar, o torque também aumentará. Por outro lado, se o fluxo magnético produzido pelo campo aumentar, o torque também aumenta para a mesma corrente de armadura.

A rotação contínua do rotor é mantida pela **comutação**, que garante que a corrente nos condutores da armadura continue mudando de direção em sincronia com a rotação, mantendo a força e o torque sempre na mesma direção.

1.1.4 Resumo do Processo de Geração de Torque

1. O enrolamento de campo (ou ímãs permanentes) gera um campo magnético no estator.
2. A corrente elétrica na armadura gera um campo magnético ao redor dos condutores.
3. A interação entre os campos magnéticos do campo e da armadura produz uma força sobre os condutores da armadura (Lei de Lorentz).
4. A soma das forças tangenciais nos condutores gera o torque que faz o rotor girar.
5. A comutação garante que a corrente na armadura continue gerando torque em uma direção constante.

1.1.5 Fatores que Influenciam o Torque

- **Corrente de Armadura (I_a):** O torque é diretamente proporcional à corrente da armadura. Quanto maior a corrente, maior o torque gerado.
- **Fluxo Magnético (Φ):** O torque também é diretamente proporcional ao fluxo magnético. Um aumento no fluxo magnético gera um aumento correspondente no torque.
- **Resistência da Armadura:** A resistência do enrolamento da armadura afeta a corrente que flui nela. Uma resistência alta pode limitar a corrente, reduzindo o torque disponível.
- **Comutação:** O sistema de comutação é crucial para garantir que o torque seja gerado continuamente na mesma direção, ajustando a corrente nos condutores da armadura à medida que o rotor gira.

1.2 Qual o perigo de alimentar a armadura a plena tensão diretamente?

Com a resistência fixa, ao se aplicar 220v, por exemplo, a corrente excede e muito a corrente máxima da carga. Pois a tensão induzida na máquina parada é nula. Da mesma forma, se retirar o campo abruptamente em funcionamento, a tensão induzida será nula, portanto a corrente se eleva.

1.3 Qual deve-se alimentar primeiro, armadura ou campo (Justifique)?

Deve-se alimentar primeiramente o circuito de campo. Ao alimentar o campo, o campo magnético necessário para a operação da máquina é gerado. Esse campo é necessário para interagir com a

corrente na armadura, seja para gerar torque ou tensão. Sem o campo magnético estabelecido, a máquina não pode operar corretamente.

1.4 Quais são as formas de partir um motor CC

Existem várias formas de partir um motor de corrente contínua:

- Na partida com resistência série, resistores são conectados em série com a armadura do motor para limitar a corrente de partida. À medida que o motor acelera e a corrente de armadura diminui, as resistências são gradualmente retiradas, permitindo que o motor atinja sua velocidade nominal com uma corrente controlada
- Na partida por controle de tensão, uma fonte de tensão variável, como um regulador de tensão CC ou um conversor de frequência, para aplicar uma tensão progressivamente crescente ao motor. Isso permite que a corrente de partida seja controlada e o motor acelere suavemente.
- A partida suave (soft-starter) utiliza componentes eletrônicos, como tiristores ou transistores, para controlar o aumento gradual da tensão aplicada ao motor. O controle é realizado eletronicamente, permitindo uma partida controlada e uma corrente de partida reduzida.
- Para motores de corrente contínua série, a partida é mais controlada devido ao fato de que a corrente da armadura e do campo são as mesmas. O aumento da corrente de partida provoca um aumento correspondente no campo magnético, o que limita a aceleração súbita do motor.

1.5 Como ligar um gerador com excitação em paralelo e em série?

Para o gerador em Derivação, o enrolamento de campo é conectado em paralelo com a armadura, o que significa que o campo e a armadura compartilham a mesma tensão, mas a corrente se divide entre eles. O gerador CC com excitação em derivação é amplamente utilizado porque oferece uma regulação de tensão relativamente boa. No gerador CC com excitação em série, o enrolamento de campo é conectado em série com a armadura e a carga. Dessa forma, a mesma corrente que passa pela carga também passa pelo campo e pela armadura, o que significa que a corrente de excitação depende diretamente da carga conectada ao gerador.

2 Introdução aos Ensaios com Máquinas de Corrente Contínua

2.1 Máquina de Corrente Contínua

A máquina de corrente contínua (CC) é um dispositivo eletromecânico que converte energia elétrica em energia mecânica (no caso dos motores) ou energia mecânica em energia elétrica (no caso dos geradores), utilizando corrente contínua. Essas máquinas são compostas por um rotor (ou armadura), um estator, escovas e um comutador, cada um desempenhando funções específicas na conversão de energia.

No caso dos motores de corrente contínua, a energia elétrica é aplicada ao enrolamento de armadura, gerando um campo magnético que interage com o campo gerado pelos enrolamentos de campo no estator. Essa interação cria um torque que faz o rotor girar, convertendo a energia elétrica em movimento mecânico.

Nos geradores de corrente contínua, o rotor é movimentado por uma fonte de energia mecânica (como um motor a combustão, uma turbina, etc.), e à medida que ele gira dentro do campo magnético criado pelos enrolamentos de campo do estator, uma tensão é induzida nos condutores

do rotor. O comutador retifica essa tensão alternada gerada no rotor, convertendo-a em corrente contínua nos terminais de saída do gerador.

O funcionamento de uma máquina de corrente contínua (CC) está fundamentado no processo de comutação, que é responsável por converter correntes e tensões alternadas geradas no rotor da máquina em correntes e tensões contínuas nos seus terminais, ou vice-versa. Essa conversão ocorre através da interação entre o rotor, também conhecido como armadura, e o comutador. O rotor gira dentro de um campo magnético fixo, e suas bobinas estão conectadas aos segmentos do comutador, que, por sua vez, fazem contato com escovas fixas no estator, permitindo o acesso externo às tensões e correntes geradas.

Nas máquinas CC, o enrolamento de armadura está localizado no rotor, enquanto os enrolamentos de campo estão no estator. À medida que a armadura gira no campo magnético gerado pelos polos do estator, uma tensão é induzida nos condutores da armadura. Quando a máquina CC opera como gerador, o rotor é movido por uma fonte de energia mecânica, o que faz com que os condutores cortem o fluxo magnético criado pelos enrolamentos de campo do estator, resultando na indução de uma tensão no rotor. Essa tensão é então retificada pelo processo de comutação e disponibilizada nos terminais de saída da máquina.

As máquinas CC podem ser classificadas de acordo com o tipo de excitação utilizada, o que as divide em duas principais categorias: máquinas com excitação independente e máquinas autoexcitadas.

Nas máquinas com excitação independente, o enrolamento de campo é alimentado por uma fonte externa, não havendo ligação elétrica entre os enrolamentos de campo e de armadura. Já nas máquinas autoexcitadas, há um acoplamento elétrico entre esses dois enrolamentos, permitindo a classificação em diferentes tipos de excitação:

Excitação série: o enrolamento de campo está conectado em série com o enrolamento de armadura. Excitação em derivação: o enrolamento de campo está em paralelo com o enrolamento de armadura. Excitação composta aditiva: o campo magnético gerado pelo enrolamento de campo série se soma ao campo produzido pelo enrolamento em derivação. Excitação composta subtrativa: o campo magnético gerado pelo enrolamento de campo série se opõe ao campo criado pelo enrolamento em derivação.

2.2 Objetivos do experimento

Os principais objetivos neste experimento são dedicados ao estudo do funcionamento da máquina de corrente contínua em regime permanente funcionando como gerador de corrente contínua. Os experimentos buscam obter parâmetros e estimar características das máquinas CC, como a resistência de campo e de armadura, bem como avaliar o comportamento da reação de armadura com cargas resistivas.

3 Cálculo da resistência dos enrolamentos da máquina CC

As resistências dos enrolamentos de armadura e de campo serão calculados a partir da utilização do multímetro, bem como pela injeção de corrente contínua no enrolamento em curto, através de uma fonte formada por um autotransformador monofásico e um voltímetro e amperímetro e uma fonte retificadora monofásica de onda completa.

3.1 Materiais e Equipamentos

- Máquina de corrente contínua (gerador/motor CC)
- Fonte de alimentação CC ajustável
- Multímetro digital
- Fios de conexão

3.2 Procedimento Experimental

3.2.1 Medição da resistência pelo multímetro

Certifique-se de que a máquina CC esteja desligada e isolada de qualquer fonte de alimentação antes de iniciar o ensaio. Então conecte o multímetro aos terminais do enrolamento de campo da máquina CC. Certifique-se de que a máquina não está sendo energizada de outra fonte durante essa medição. No multímetro, selecione a função de resistência (Ω) e faça a leitura direta da resistência do enrolamento de campo. Repita o procedimento para o enrolamento da armadura, conectando os terminais do multímetro diretamente nos terminais do rotor.

3.2.2 Medição da resistência por injeção de corrente contínua

Conecte o voltímetro e o amperímetro nos terminais dos enrolamentos. A corrente deve ser mantida baixa (em torno de 0,5-2 A) para evitar o superaquecimento do enrolamento. Meça a tensão nos terminais do enrolamento e calcule a resistência dos enrolamentos utilizando a lei de Ohm

$$R = \frac{V}{I}$$

VF (V)	IF (A)	Resistência do Campo (Ω)	VA (V)	IA (A)	Resistência da Armadura (Ω)
2003	0.6	338.33	6	3.16	1.90

Tabela 01: Resultados Cálculo da Resistência dos Enrolamentos.

Os resultados obtidos experimentalmente com o multímetro para a resistência do enrolamento de campo foram de 344,2 Ω , enquanto a resistência da armadura foi de 1,9 Ω . Esses valores são bastante típicos para uma máquina de corrente contínua, onde a resistência do campo tende a ser significativamente maior do que a resistência da armadura devido ao número maior de espiras e à bitola menor dos condutores.

Quando comparamos esses valores com os obtidos pelo método da Lei de Ohm, observamos uma correspondência bastante próxima. Para o campo, obtivemos um valor de 338,33 Ω , o que mostra uma diferença de aproximadamente 1,7% em relação ao valor medido pelo multímetro. Essa diferença pode ser atribuída a variações nas condições experimentais, como oscilações na corrente de excitação ou erros de precisão nos instrumentos de medição. A resistência da armadura medida pelo método da Lei de Ohm também foi 1,9 Ω , o que demonstra uma excelente concordância com o valor obtido diretamente pelo multímetro.

Esses resultados indicam que ambos os métodos são eficazes para a medição da resistência dos enrolamentos de máquinas CC, embora o uso de um multímetro seja mais direto e rápido. Entretanto,

o método da Lei de Ohm pode ser vantajoso em situações onde os enrolamentos estão conectados a circuitos mais complexos, impossibilitando a medição direta.

4 Ensaio de Circuito Aberto

Neste ensaio, o gerador foi acionado por uma máquina síncrona, e as variações de tensão terminal da armadura foram registradas em função da corrente de excitação do campo.

4.1 Materiais e Equipamentos

- Máquina de corrente contínua (gerador CC)
- Motor síncrono para acionar o gerador
- Fonte de alimentação ajustável para o campo do gerador
- Voltímetro digital
- Amperímetro digital
- Tacômetro para medir a velocidade do eixo
- Fios de conexão

4.2 Procedimento Experimental

Monte o gerador CC e conecte-o a um motor síncrono, que servirá como máquina primária para acionar o eixo do gerador. Conecte a fonte de corrente contínua (CC) ao enrolamento de campo do gerador. Por fim, conecte um voltímetro aos terminais da armadura do gerador. Ligue o motor síncrono ou de indução e ajuste a rotação do eixo para uma velocidade constante. Utilize o tacômetro para monitorar a rotação e garantir que ela permaneça constante durante todo o ensaio. Com o eixo do gerador girando a uma velocidade constante, comece a aumentar gradualmente a corrente de excitação do campo, ajustando a fonte de alimentação CC. Para cada valor de corrente de excitação, registre a tensão terminal gerada na armadura do gerador (V_t) e a corrente de excitação (I_f).

IF (mA)	Vt (V)	Vf (V)
0.00	8.30	0.00
50.00	45.80	22.80
100.00	75.20	41.50
150.00	108.20	61.80
200.00	133.30	70.20
250.00	163.70	97.80
300.00	187.90	117.20
350.00	208.80	136.80
400.00	230.40	157.20
450.00	246.40	178.50
500.00	260.60	203.00
550.00	272.80	227.00
600.00	282.60	248.00

Tabela 02: Resultados do Ensaio de Circuito Aberto.

A curva de magnetização deve apresentar um comportamento inicialmente linear, com a tensão aumentando proporcionalmente à corrente de excitação. No entanto, após um certo ponto, o aumento na tensão começa a se reduzir, indicando a saturação do material magnético no gerador.

```
[3]: import matplotlib.pyplot as plt

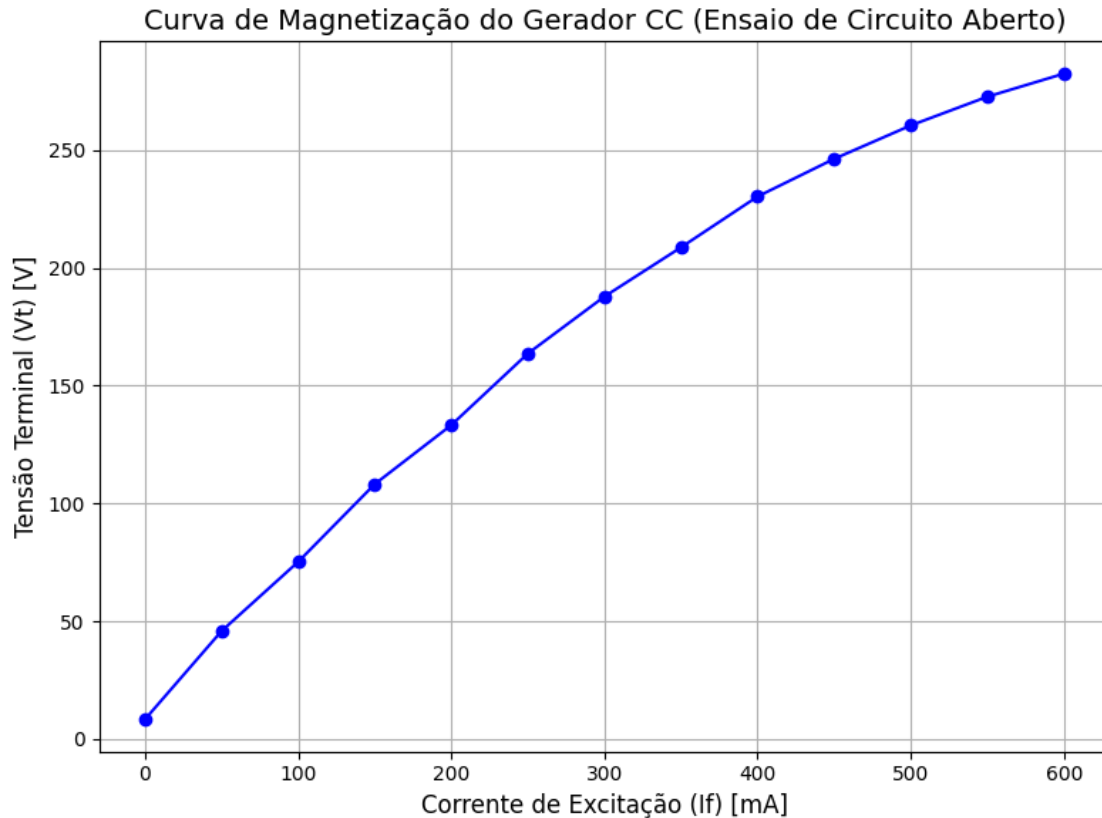
# Dados obtidos do ensaio de circuito aberto (Tabela 2)
corrente_excitacao = [0.00, 50.00, 100.00, 150.00, 200.00, 250.00, 300.00,
                      350.00, 400.00, 450.00, 500.00, 550.00, 600.00] # If (mA)
tensao_terminal = [8.30, 45.80, 75.20, 108.20, 133.30, 163.70, 187.90,
                  208.80, 230.40, 246.40, 260.60, 272.80, 282.60] # Vt (V)

# Criar o gráfico da curva de magnetização
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.plot(corrente_excitacao, tensao_terminal, marker='o', linestyle='-',
        color='b')

# Adicionar títulos e rótulos
plt.title('Curva de Magnetização do Gerador CC (Ensaio de Circuito Aberto)',
        fontsize=14)
plt.xlabel('Corrente de Excitação (If) [mA]', fontsize=12)
plt.ylabel('Tensão Terminal (Vt) [V]', fontsize=12)

# Melhorar a visualização
plt.grid(True)
plt.tight_layout()

# Mostrar o gráfico
plt.show()
```



A tabela de dados mostra a relação entre a corrente de excitação do campo (I_f), a tensão gerada no campo (V_f) e a tensão terminal do gerador (V_t). A curva de saturação do gerador foi traçada a partir desses dados, representando a tensão terminal (V_t) em função da corrente de excitação (I_f). A curva de saturação indica que, para valores baixos de I_f , o aumento da corrente de excitação resulta em um aumento linear na tensão terminal. No entanto, à medida que a corrente de excitação aumenta, a taxa de aumento da tensão diminui, caracterizando a saturação do material magnético.

5 Ensaio com Carga – Sem Compensação da Reação da Armadura

Para cargas de grandes potências consumidas ligadas a um gerador, o efeito da reação da armadura provoca uma queda de tensão na resistência da armadura, ocasionando uma queda de tensão terminal do gerador muito acentuada.

5.1 Materiais e Equipamentos

- Gerador CC de excitação independente
- Carga resistiva (lâmpadas incandescentes ou resistores de potência)
- Voltímetro e amperímetro digitais
- Fonte de corrente contínua para o campo
- Motor síncrono ou de indução para acionar o gerador

5.2 Procedimento Experimental

Conecte o voltímetro aos terminais da armadura do gerador e o amperímetro em série com a armadura para medir a corrente. Ligue o motor síncrono e ajuste a velocidade para manter uma rotação constante do eixo do gerador, conforme o valor nominal especificado. Ajuste a fonte de excitação para um valor fixo de corrente no enrolamento de campo. Conecte o gerador a um painel de cargas composto por lâmpadas incandescentes ou resistores de potência, que servirão como carga resistiva, começando com poucas lâmpadas conectadas. Aumente gradualmente a carga, conectando mais lâmpadas em paralelo. Para cada valor de carga, registre a corrente de armadura (I_a) e a tensão terminal do gerador (V_t). Após a última medição, desconecte gradualmente as cargas e reduza a corrente de excitação.

Potência das Lâmpadas (W)	Potência Calculada (W)	Ia (A)	Vt (V)
0.00	0.00	0.00	220.00
200.00	174.70	0.84	208.00
500.00	346.00	1.85	187.00
700.00	462.80	2.59	178.70
1000.00	564.10	3.40	165.90
1200.00	646.80	4.05	159.70
1500.00	771.10	5.40	142.80
1700.00	838.00	5.99	139.90
2000.00	856.70	6.19	138.40
2200.00	819.70	6.90	118.80

Tabela 03: Resultados do Ensaio com Carga (Sem Compensação).

É esperado que a tensão terminal do gerador caia à medida que a carga aumenta, devido ao efeito da reação da armadura. A reação da armadura ocorre quando o campo magnético gerado pela corrente de armadura distorce o campo principal, reduzindo a tensão gerada.

6 Ensaio com Carga – Com Compensação da Reação da Armadura

Neste ensaio, a queda de tensão causada pela reação da armadura será compensada ajustando a corrente de excitação do campo de maneira a manter a tensão terminal constante, mesmo com o aumento da carga.

6.1 Materiais e Equipamentos

- Gerador CC de excitação independente
- Carga resistiva (lâmpadas ou resistores de potência)
- Fonte de corrente contínua ajustável para o campo
- Voltímetro e amperímetro digitais
- Motor síncrono para acionar o gerador

6.2 Procedimento Experimental

Dê partida ao motor e ajuste a rotação do gerador para o valor nominal. Aumente gradualmente a carga, conectando mais lâmpadas ou resistores. Para cada aumento de carga, ajuste a corrente

de excitação de modo que a tensão terminal do gerador permaneça constante (aproximadamente 200 V). Registre a corrente de armadura (I_a), a corrente de excitação (I_f) e a tensão terminal (V_t) para cada valor de carga.

Potência das Lâmpadas (W)	Potência Gerada (W)	I_f (A)	I_a (A)	V_t (V)
200.00	162.16	0.33	0.81	200.20
500.00	388.39	0.35	1.94	200.20
700.00	550.55	0.36	2.75	200.20
1000.00	754.00	0.37	3.77	200.00
1200.00	914.00	0.38	4.57	200.00
1500.00	1134.83	0.40	5.66	200.50
1700.00	1290.00	0.42	6.45	200.00
2000.00	1507.25	0.43	7.54	199.90
2200.00	1673.34	0.45	8.35	200.40

Tabela 04: Resultados do Ensaio com Carga (Com Compensação).

7 Discussões sobre a reação de armadura

A reação da armadura é um fenômeno comum em máquinas de corrente contínua, onde o campo magnético gerado pela corrente da armadura interage com o campo principal, distorcendo-o e reduzindo a tensão terminal gerada. Para entender esse efeito, realizamos dois ensaios: um com carga resistiva sem compensação e outro com compensação da reação da armadura.

No ensaio sem compensação, o gerador CC foi conectado a uma carga resistiva (lâmpadas incandescentes), e a corrente de armadura (I_a) e a tensão terminal (V_t) foram medidas para diferentes níveis de carga. A Tabela 3 mostra que, à medida que a corrente de armadura aumenta com o acréscimo de carga, ocorre uma queda significativa na tensão terminal. Por exemplo, quando a corrente de armadura aumenta de 0,84 A para 6,9 A, a tensão terminal cai de 208,0 V para 118,8 V.

Essa queda acentuada pode ser atribuída ao efeito combinado da reação da armadura e da resistência interna da armadura. A reação da armadura distorce o campo magnético principal, reduzindo a força eletromotriz (FEM) gerada e, conseqüentemente, a tensão terminal. Além disso, a resistência interna da armadura contribui para a queda de tensão, já que a tensão terminal é afetada pela queda de tensão no enrolamento de armadura.

No segundo ensaio, implementou-se uma compensação da reação da armadura ajustando a corrente de excitação para manter a tensão terminal constante, mesmo com o aumento da carga. A Tabela 4 mostra que, ao aplicar a compensação, a tensão terminal se manteve praticamente constante (cerca de 200 V), mesmo com a corrente de armadura variando de 0,81 A a 8,35 A.

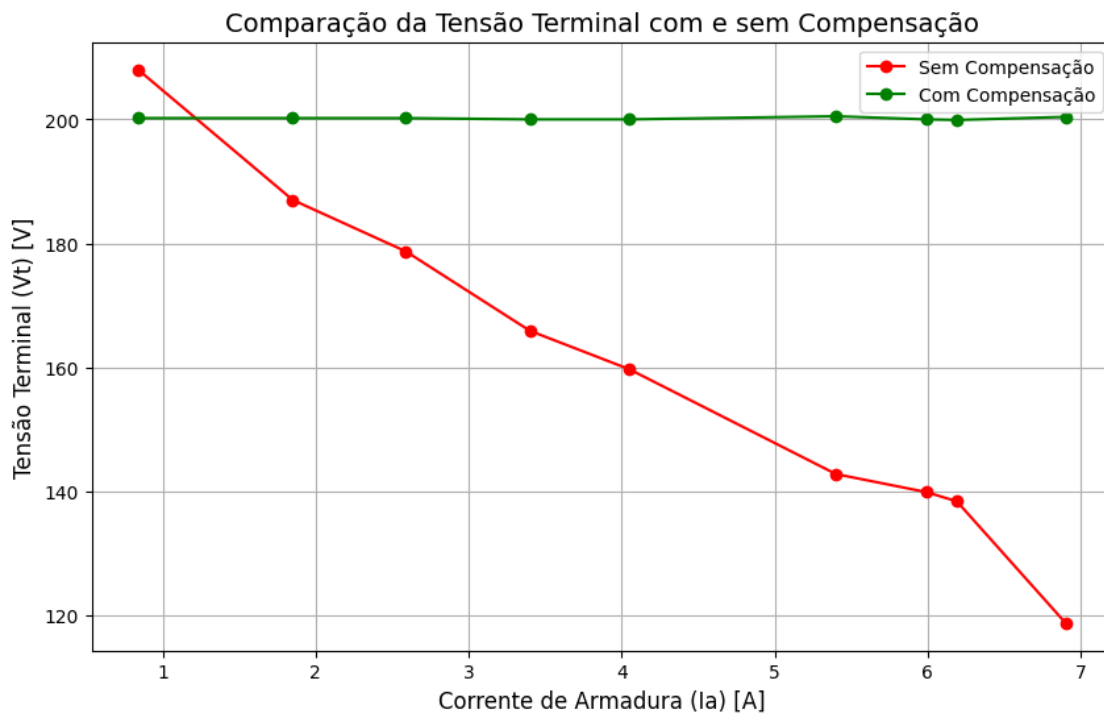
Esse resultado demonstra a eficácia da compensação na redução dos efeitos da reação da armadura. Ao ajustar a corrente de excitação, o campo magnético principal foi reforçado, compensando a distorção causada pelo campo gerado pela corrente de armadura. Como resultado, a tensão terminal permaneceu praticamente inalterada, garantindo uma operação mais estável do gerador sob condições de carga.

```
[4]: # Dados sem compensação
corrente_armadura = [0.84, 1.85, 2.59, 3.40, 4.05, 5.40, 5.99, 6.19, 6.90] #  $I_a$  (A)
tensao_sem_compensacao = [208.0, 187.0, 178.7, 165.9, 159.7, 142.8, 139.9, 138.4, 118.8] #  $V_t$  (V)

# Dados com compensação
tensao_com_compensacao = [200.2, 200.2, 200.2, 200.0, 200.0, 200.5, 200.0, 199.9, 200.4] #  $V_t$  (V)

# Plot comparativo
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(corrente_armadura, tensao_sem_compensacao, marker='o', linestyle='--', color='r', label='Sem Compensação')
plt.plot(corrente_armadura, tensao_com_compensacao, marker='o', linestyle='--', color='g', label='Com Compensação')

# Configurando o gráfico
plt.title('Comparação da Tensão Terminal com e sem Compensação', fontsize=14)
plt.xlabel('Corrente de Armadura ( $I_a$ ) [A]', fontsize=12)
plt.ylabel('Tensão Terminal ( $V_t$ ) [V]', fontsize=12)
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```



8 Ensaio para determinação de perdas rotacionais, elétricas e magnéticas da Máquina CC operando como Motor com excitação independente

Ao iniciar o funcionamento da máquina como motor CC com excitação independente, deve-se inicialmente ter alguns cuidados. O enrolamento de campo deve ser alimentado com corrente contínua antes que se proceda a alimentação do circuito da armadura, formada por um autotransformador trifásico em série com uma fonte retificadora trifásica simétrica.

8.1 Materiais e Equipamentos

- Motor CC de 4 polos
- Autotransformador trifásico
- Fonte retificadora trifásica
- Wattímetros
- Multímetros
- Tacômetro
- Carga resistiva (lâmpadas)
- Máquina síncrona para acoplamento

8.2 Procedimento Experimental

Antes de iniciar o ensaio, o campo deve ser energizado. O motor CC, no caso de excitação independente, requer que o enrolamento de campo seja alimentado por uma fonte de corrente contínua (CC) separada. Isso assegura a geração de um campo magnético estável antes de energizar a armadura. Conecte a armadura do motor a uma fonte retificadora trifásica simétrica por meio de um autotransformador. O autotransformador permite o ajuste gradual da tensão aplicada à armadura, de forma que o motor acelere suavemente. Ajuste lentamente a tensão da armadura, garantindo que a corrente de armadura não ultrapasse o valor nominal. Durante esse processo, a rotação do motor aumenta até atingir o regime permanente, onde o motor estabiliza sua velocidade. Utilize um tacômetro ou tacogerador, ajustando a rotação do motor para 1800 rpm.

Uma vez que o motor atinge o regime permanente, são realizadas medições de corrente e tensão nos terminais de armadura. O consumo de potência é medido no lado CA utilizando o método dos dois wattímetros. O erro entre a potência medida no lado CA e a potência calculada no lado CC é determinado para análise das perdas. As medições são realizadas com o motor operando em diferentes condições de carga: sem carga, acoplado ao gerador (sem excitação e com excitação), e com o gerador em carga utilizando lâmpadas de diferentes potências (450 W, 900 W, 1350 W).

Condição	Ia (A)	V (V)	Pac (W)	Pcc (W)	Erro (%)
Motor CC sem carga	0,87	221,3	200	192,53	3,73
Motor CC acoplado ao gerador (sem excitação)	1,13	220,6	260	249,28	4,12

Condição	Ia (A)	V (V)	Pac (W)	Pcc (W)	Erro (%)
Motor CC acoplado ao gerador (com excitação)	1,3	224,7	300	292,11	2,63
Motor CC com carga de lâmpadas de 450 W	3,27	228,9	760	748,50	1,51
Motor CC com carga de lâmpadas de 900 W	5,68	232,1	1340	1318,33	1,62
Motor CC com carga de lâmpadas de 1350 W	8,86	232,4	2060	2059,06	0,05

Tabela 05: Potências Medidas e Calculadas para Diferentes Cargas.

As perdas elétricas, magnéticas e mecânicas são evidentes ao comparar a potência calculada (Pcc) com a potência medida no lado CA (Pac). Para o motor sem carga, as perdas são pequenas, em torno de 3,73%. À medida que a carga aumenta, as perdas também aumentam ligeiramente. No caso de cargas maiores, as perdas são principalmente associadas a fatores como atrito mecânico, resistência dos enrolamentos e perdas de comutação, além das perdas no ferro (histerese e correntes parasitas).

9 Comentários sobre a excitação série, paralelo e composta.

No motor CC com excitação em derivação, o campo e a armadura são conectados em paralelo. Portanto, tanto o enrolamento de campo quanto o de armadura são alimentados pela mesma fonte, que neste caso é a fonte retificadora trifásica simétrica. Certifique-se de que o campo é energizado juntamente com a armadura. O autotransformador é utilizado para aumentar a tensão da armadura de maneira gradual. Como o campo está em paralelo com a armadura, ele se autoajusta para fornecer a excitação necessária à medida que a tensão aplicada aumenta.

Para configurar o motor com excitação série, o enrolamento de campo é conectado em série com a armadura. Isso significa que a corrente que passa pela armadura também atravessa o campo, criando um forte campo magnético que aumenta conforme a carga aumenta. O autotransformador é utilizado para elevar a tensão da armadura de forma gradual, observando sempre a corrente para garantir que não ultrapasse os limites nominais. À medida que o motor começa a girar, a corrente de excitação aumenta e o campo magnético intensifica. Durante o ensaio, são feitas medições de corrente e tensão nos terminais da armadura. Como o campo está em série, a corrente medida na armadura também é a corrente que flui pelo campo.

Para configurar a excitação composta, o motor deve ter enrolamentos de campo em série e em paralelo. Na configuração composta aditiva, os campos série e paralelo reforçam o campo magnético total. Na configuração composta subtrativa, o campo série se opõe ao campo paralelo, enfraquecendo o campo total. O motor é ligado com o autotransformador, e a tensão aplicada à armadura é aumentada gradualmente. Dependendo da configuração (aditiva ou subtrativa), o campo total será fortalecido ou enfraquecido à medida que a corrente aumenta. As medições de corrente e tensão são feitas tanto na armadura quanto nos campos série e paralelo. As leituras são registradas e a potência consumida é medida com os dois wattímetros no lado CA.

10 Pesquisa: Controle de Velocidade do Motor de Corrente Contínua (CC)

O controle de velocidade de um motor de corrente contínua (CC) é uma tarefa essencial em diversas aplicações industriais e automotivas. A flexibilidade dos motores CC permite um controle preciso da velocidade por meio de ajustes na tensão da armadura, na corrente de campo ou ambos. Para entender o processo de controle de velocidade, precisamos explorar as variáveis que influenciam a rotação do motor, analisar o comportamento dinâmico e projetar controladores adequados, como o controlador PID.

10.1 Controle de Tensão da Armadura

Este é o método mais comum e eficaz para controlar a velocidade de um motor CC. A tensão aplicada à armadura (V_a) é diretamente proporcional à velocidade do motor. A equação da força contraeletromotriz (FEM) é dada por:

$$E = k_e \cdot \Phi \cdot \omega$$

Onde:

- E é a FEM gerada pela armadura (em volts),
- k_e é a constante da máquina,
- ϕ é o fluxo magnético gerado pelo campo (em Weber),
- ω é a velocidade angular do motor (em rad/s).

Se mantivermos o fluxo magnético constante, a velocidade angular pode ser controlada diretamente variando a tensão aplicada à armadura:

$$V_a = E + I_a \cdot R_a$$

Onde:

- V_a é a tensão aplicada à armadura,
- I_a é a corrente da armadura,
- R_a é a resistência da armadura.

O controle da tensão da armadura é amplamente utilizado em aplicações que exigem controle preciso de velocidade e resposta rápida.

10.2 Controle da Corrente de Campo (Controle de Fluxo)

Outra maneira de controlar a velocidade é variar o fluxo magnético (Φ) gerado pelo campo. A velocidade de um motor CC é inversamente proporcional ao fluxo magnético. Assim, se reduzirmos a corrente de campo (I_f), o fluxo magnético diminui e a velocidade aumenta. A equação para a velocidade neste caso é:

$$\omega = \frac{V_a}{k_e \cdot \Phi}$$

Reduzir o fluxo magnético permite que o motor atinja velocidades acima do valor nominal, mas isso também reduz o torque gerado, uma vez que o torque é diretamente proporcional ao fluxo magnético.

Este método de controle é normalmente usado quando se deseja aumentar a velocidade além da nominal (controle acima da velocidade base).

10.3 Controle Combinado (Armatura + Campo)

Em algumas aplicações, uma combinação do controle de tensão da armadura e da corrente de campo é usada para obter um controle mais flexível sobre o motor. O controle da armadura é utilizado para velocidades abaixo da nominal, enquanto o controle de campo é usado para velocidades acima da nominal. Essa combinação oferece uma ampla faixa de controle de velocidade, sendo usada em aplicações industriais que exigem grande variação de velocidades, como em guindastes e elevadores.

10.4 Modelo Matemático do Motor CC e Dedução da Função de Transferência

O comportamento dinâmico de um motor CC pode ser modelado usando equações que descrevem suas propriedades elétricas e mecânicas. Vamos deduzir a função de transferência que relaciona a velocidade angular (ω) com a tensão de entrada (V_a).

10.4.1 Equação Elétrica

A equação que descreve a tensão da armadura é:

$$V_a(t) = E(t) + I_a(t) \cdot R_a + L_a \cdot \frac{dI_a(t)}{dt}$$

Onde:

- $V_a(t)$ é a tensão aplicada à armadura,
- $E(t)$ é a força contraeletromotriz (FEM),
- R_a é a resistência da armadura,
- L_a é a indutância da armadura,
- $I_a(t)$ é a corrente da armadura,
- $\frac{dI_a(t)}{dt}$ é a derivada da corrente da armadura em relação ao tempo.

Sabemos que a FEM $E(t)$ é proporcional à velocidade angular do motor ($\omega(t)$):

$$E(t) = k_e \cdot \omega(t)$$

10.4.2 Equação Mecânica

A equação mecânica que descreve a rotação do motor é baseada na Segunda Lei de Newton aplicada à rotação:

$$T(t) - T_{carga} = J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + B \cdot \omega(t)$$

Onde:

- $T(t)$ é o torque gerado pela armadura (em $\text{N} \cdot \text{m}$),
- T_{carga} é o torque da carga,
- J é o momento de inércia do rotor (em $\text{kg} \cdot \text{m}^2$),
- B é o coeficiente de atrito viscoso (em $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$),
- $\frac{d\omega(t)}{dt}$ é a derivada da velocidade angular.

Sabemos que o torque gerado pela armadura é proporcional à corrente de armadura:

$$T(t) = k_t \cdot I_a(t)$$

10.5 Função de Transferência

Agora, substituímos as equações no domínio de Laplace para obter a função de transferência que relaciona a velocidade angular com a tensão de armadura.

No domínio de Laplace:

$$V_a(s) = I_a(s) \cdot R_a + L_a \cdot s \cdot I_a(s) + k_e \cdot \omega(s)$$

$$T(s) = k_t \cdot I_a(s)$$

$$T(s) - T_{carga} = J \cdot s \cdot \omega(s) + B \cdot \omega(s)$$

Como não estamos considerando a carga no sistema de controle, $T_{carga} = 0$. Assim, substituímos $T(s)$ na equação mecânica:

$$k_t \cdot I_a(s) = J \cdot s \cdot \omega(s) + B \cdot \omega(s)$$

Resolvendo para $I_a(s)$:

$$I_a(s) = \frac{J \cdot s + B}{k_t} \cdot \omega(s)$$

Substituímos essa expressão na equação elétrica:

$$V_a(s) = \left(\frac{J \cdot s + B}{k_t} \right) \cdot R_a + L_a \cdot s \cdot \left(\frac{J \cdot s + B}{k_t} \right) \cdot \omega(s) + k_e \cdot \omega(s)$$

Agora, reorganizamos para obter a função de transferência:

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{k_t}{(J \cdot s + B)(L_a \cdot s + R_a) + k_e \cdot k_t}$$

Essa é a função de transferência que descreve a relação entre a velocidade angular $\omega(s)$ e a tensão de entrada $V_a(s)$.

10.6 Projeto de um Controlador PID

Agora que temos a função de transferência do motor CC, podemos projetar um **controlador PID** para realizar o controle de velocidade com uma referência de degrau unitário.

O controlador PID tem a seguinte forma:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s$$

Onde:

- K_p é o ganho proporcional,
- K_i é o ganho integral,
- K_d é o ganho derivativo.

O objetivo do controlador PID é ajustar esses parâmetros para minimizar o erro entre a velocidade desejada e a velocidade real do motor, garantindo uma resposta rápida, com baixo sobrepico e sem erro em regime permanente.

11 Implementação em Python

```
[ ]: import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy import signal
from scipy.integrate import odeint
import control as ctrl

# Parâmetros do motor CC
J = 0.01      # Momento de inércia
B = 0.1       # Atrito viscoso
R_a = 1       # Resistência da armadura
L_a = 0.5     # Indutância da armadura
k_e = 0.01    # Constante da FEM
k_t = 0.01    # Constante do torque

# Função de transferência do motor CC
num_motor = [k_t]
den_motor = [J*L_a, J*R_a + B*L_a, B*R_a + k_e*k_t]
motor_tf = ctrl.TransferFunction(num_motor, den_motor)

# Parâmetros do controlador PID
Kp = 120
Ki = 200
Kd = 10

# Função de transferência do controlador PID
pid_controller = ctrl.TransferFunction([Kd, Kp, Ki], [1, 0])
```

```

# Função de transferência do sistema em malha fechada (PID + Motor)
closed_loop_tf = ctrl.feedback(pid_controller * motor_tf)

# Simulação de resposta ao degrau
t = np.linspace(0, 2, 1000)
t, y = ctrl.step_response(closed_loop_tf, t)

# Plot da resposta
plt.plot(t, y)
plt.title('Resposta ao Degrau Unitário com Controle PID')
plt.xlabel('Tempo [s]')
plt.ylabel('Velocidade Angular [rad/s]')
plt.grid(True)
plt.show()

```

